

Денис Анатолійович Сагайдак,

аспірант 3-го року навчання кафедри загальної екології та безпеки життєдіяльності
Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна
orcid.org/0000-0002-7184-7730, e-mail: denik04@ukr.net

Володимир Миколайович Боголюбов,

доктор педагогічних наук, професор кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки
життєдіяльності
Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна
orcid.org/0000-0001-5181-6892, e-mail: volbog@ukr.net

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ЗАСОБІВ ВЕДЕННЯ ВІЙСЬКОВОГО ВОГНЮ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ

Анотація. У роботі викладено методичні вказівки та рекомендації з вимірювання впливу воєнних дій на якість атмосферного повітря переважно за такими показниками, як дрібнодисперсний пил (тверді часточки в 2,5 та 10 мкм/м³ – ТЧ2,5, ТЧ10), формальдегіди, діоксид азоту, діоксид сірки, чадний газ та озон. Передбачено аналіз впливу різних засобів ведення вогню (артилерія, танки, гранатомети, кулемети, тощо) з використанням пересувних автоматичних станцій спостереження, здатних безперервно фіксувати зміни якості повітря, або спеціально сконструйованого квадрокоптеру із газоаналізатором, які безперервно можуть вимірювати рівень забруднення атмосферного повітря, а також миттєво пересувати точку вимірювання як по площині, так і по вертикалі. Вимірювання проводяться в наближених до реальних умовах ведення бою з урахуванням усіх факторів впливу на результати вимірювання. Розташування аналізуючих приладів було обрано із урахуванням факторів впливу на сенсори. Експериментальним шляхом знайдено оптимальну відстань до епіцентрів забруднень (вибухів). Розглядаються два таких сценарії: аналіз якості повітря безпосередньо в місці пострілу та зміни якості повітря в місці влучання гранати, снаряду тощо. Отримані після пострілів дані записуються у відповідні таблиці та порівнюються із фоновими і нормативними показниками. Для вимірювання якості атмосферного повітря в місцях пострілу та прильоту передбачена можливість виконувати зняття показників дистанційно з використанням спеціально сконструйованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з дистанційною працюючою онлайн-камерою та GPS-навігацією для точного переміщення автоматичних газоаналізаторів.

Безпілотний апарат використовується зі збереженням техніки безпеки під наглядом відповідних дозвільних служб. Результати всіх вимірювань свідчать про різке підвищення вмісту забруднюючих речовин, спричинене саме засобами ведення вогню. Отримані дані можна рекомендувати для використання у розрахунках завданої шкоди навколишньому середовищу від воєнних дій.

Ключові слова: моніторинг атмосферного повітря, дрібнодисперсний пил, забруднення, газоаналізатор.

ВСТУП

Численні громадські та державні організації фіксують злочини російських окупантів проти українського довкілля для підготовки позовів до Міжнародного

кримінального суду [1]. Повномасштабна війна триває вже понад два роки, що актуалізує проведення комплексних досліджень щодо впливу воєнних дій та супутніх факторів на українське довкілля, зокрема на якість атмосферного повітря [2; 3]. Окремі події точково (одномоментно) впливають на довкілля, а системні моніторингові дослідження впливу воєнних дій протягом тривалого періоду часу дозволяють зробити висновки, які можуть стати підґрунтям для прийняття управлінських рішень щодо відновлення якості довкілля після завершення воєнних дій [4; 5]. Залежно від результатів дослідження такі висновки можуть впливати на політику як на місцевому, так і на національному рівні, стати складовою частиною підготовки міжнародних позовів щодо стягнення компенсації за збитки, формувати уявлення як українців, так і міжнародної спільноти про зміни стану довкілля в Україні, які були спричинені військовою агресією росії [6; 7].

Усі фактори впливу на довкілля проаналізувати нереально через те, що в гарячих точках просто неможливо встановити спеціальне обладнання та провести повноцінний аналіз як атмосферного повітря, так і поверхневих вод чи ґрунту [8; 9]. Якщо ж провести точкові дослідження впливу окремого фактору та визначити приблизний кількісний склад забруднювальних речовин, то можна максимально наблизитись до дійсних масштабів завданої шкоди навколишньому середовищу. Це допоможе вирахувати заподіяні збитки та більш детально скласти мапу із заподіяною шкодою та ступенем забруднення в різних регіонах країни, що стане підґрунтям для прийняття управлінських рішень щодо відновлення довкілля і, зокрема, якості атмосферного повітря в післявоєнний період.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У цій роботі основна увага була зосереджена на впливі вогнепальної зброї на якість атмосферного повітря, оскільки кількість пострілів із різноманітної зброї нараховує просто неймовірну кількість випущених гранат, снарядів, мін та інших засобів ураження. Проаналізувавши вплив одного пострілу та знаючи приблизну середню кількість випущених снарядів (куль) за день, можна вирахувати наближений негативний вплив на атмосферне повітря упродовж всього періоду воєнних дій [10]. Такий метод вимірювання можна використовувати для всіх видів зброї, уточнення та зміни в розташуванні обладнання можуть змінюватися відповідно до радіусу ураження конкретного виду озброєння (що більшим є калібр, то вищою є амплітуда поширення). Для врахування метеорологічних факторів доцільно використовувати методіку математичного моделювання з використанням алгоритмів асиміляції просторових даних [11].

Розглянуто два сценарії можливого розвитку подій з огляду на те, що негативний вплив на атмосферне повітря і завдана шкода від конкретного точкового пострілу може бути як в місці вильоту снаряду (кулі), так і в місці його прильоту. В подальшому при польових дослідженнях будуть використовуватись відповідні позначення (рис. 1):

- “Out” позначає вихід пострілу;
- “In” позначає місце прильоту снаряду чи кулі.

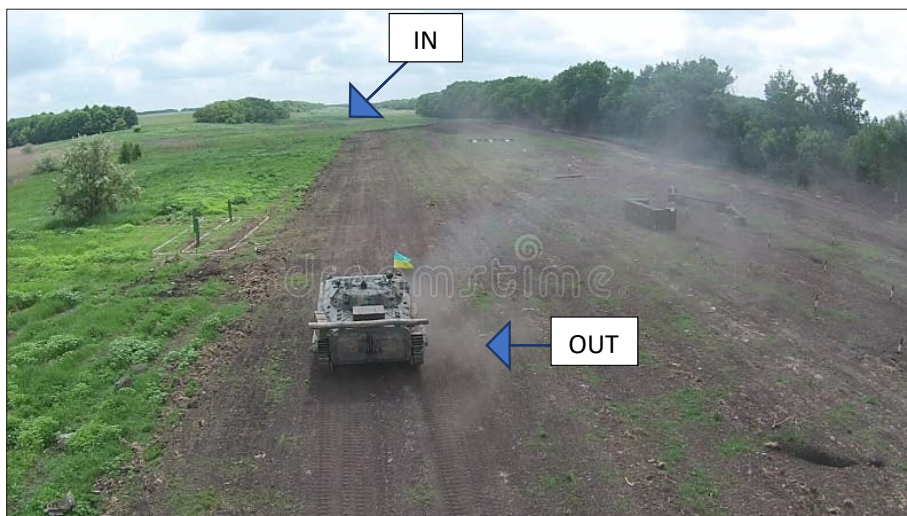


Рис. 1. Розташування обладнання для різних сценаріїв

РЕЗУЛЬТАТИ

Отримані після пострілів на полігоні показники якості атмосферного повітря фіксуються (табл. 1) і порівнюються з фоновими показниками (вимірними цим же приладом до пострілу). Враховуються такі показники якості повітря, як дрібнодисперсний пил ТЧ2.5, ТЧ10, формальдегіди, монооксид вуглецю (чадний газ) і озон.

Таблиця 1

Результати польових досліджень якості атмосферного повітря

Сценарій 1(IN)	Через 1 хв	Через 5 хв	Через 10 хв	Через 30 хв	Фонове		
ТЧ2.5, мкг/м ³	4,3	4,1	3,7	3,9	2,4		
ТЧ10, мкг/м ³	12,6	13,1	9,8	6,6	3,1		
СН ₂ О (формальдегід), мкг/м ³	0,98	0,3	1,43	1,09	1,22		
СО, мкг/м ³	864,41	643,2	667,3	632,16	626,95		
О ₃ , мкг/м ³	55,52	55,58	55,58	55,56	55,54		
Сценарій 2 (OUT)	Через 1 хв			Через 10 хв			
	ББ	ЗБік	ЗВзд	ББ	ЗБік	ЗВзд	
ТЧ2.5, мкг/м ³	12,5	4,1	3,2	3,7	3,9	4,2	3,8
ТЧ10, мкг/м ³	45,6	19,8	16,1	12,3	11,5	13,1	10,4
СН ₂ О (формальдегід), мкг/м ³							0,12
СО, мкг/м ³	1457,18	769,6	801,4	841,07	712,0	744,76	756,33
О ₃ , мкг/м ³	55,52	55,58	55,58	55,56	55,54	55,52	55,58

Усі обрані показники відібрані спеціально під індекс якості повітря відповідно до світових програм, які зараз активно використовуються. Самі показники стану

атмосферного повітря (концентрація дрібнодисперсного пилу, формальдегіду тощо) є незрозумілими широкій громадськості і, відповідно, потрібно конвертувати їх у показник Air Quality Index, який показує зв'язок між результатами спостережень і впливом на довкілля та населення [12].

В подальшому на території стрілецького полігону було проведено вимірювання концентрацій дрібнодисперсного пилу (ТЧ2.5, ТЧ10), СО та формальдегіду (після пострілів із автомату Калашникова) за допомогою газоаналізатора СЕМ DT-9881.

При визначенні місця розміщення обладнання для аналізу стану повітря потрібно брати до уваги рівень небезпеки під час проведення даного вимірювання. З огляду на це обладнання для проведення експерименту потрібно обирати таке, яке може знімати показники за безпосередньої відсутності людини або може передавати дані онлайн на бездротовий носій.

Сценарій “IN”. При вимірюванні концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за сценарієм “IN”, який є найбільш небезпечним, потрібно розмішувати обладнання таким чином, щоб при проведенні пострілу неможливо було заподіяти шкоди апаратурі (рис. 2). Пропорційно до потужності пострілу відстань від обладнання до місця прильоту може змінюватись. При проведенні експериментів нічого зайвого не повинно впливати на показники. Газоаналізатор СЕМ DT-9881 протягом перших 10 хвилин знімає фонові дані без використання засобів ураження цілей.

Сценарій “OUT”. При вимірюванні показників стану атмосферного повітря за сценарієм “OUT” газоаналізатори СЕМ DT-9881 розташовуються у трьох точках (рис. 3).

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в експериментальних дослідженнях наслідків воєнних дій. Інтерес у використанні БПЛА у багатьох різноманітних сферах діяльності людини постійно зростає. БПЛА – мобільний автономний апарат, що є різновидом літаючих роботів, запрограмований на виконання певних завдань з можливістю передачі часткового або повного управління людині (оператору) [13].

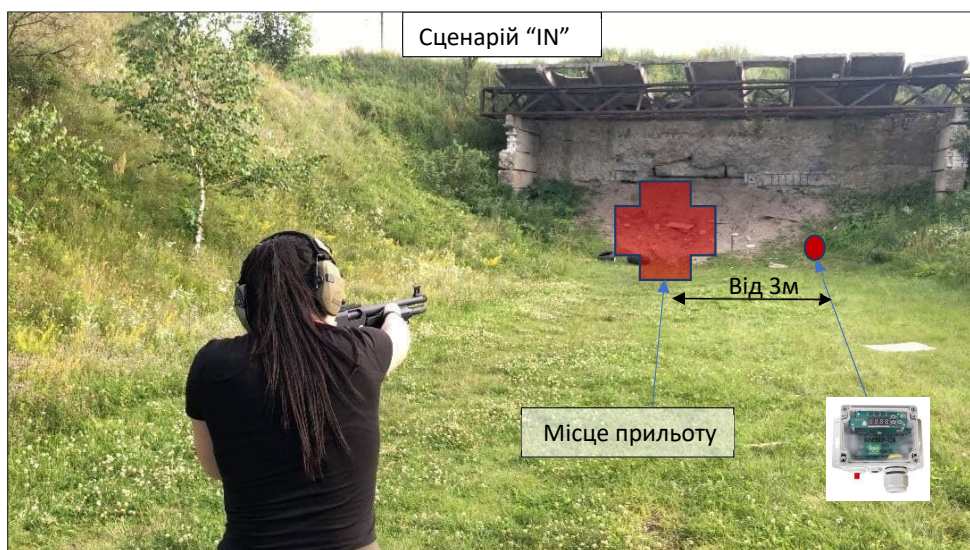


Рис. 2. Схема розташування обладнання для сценарію “IN”



Рис. 3. Схема розташування обладнання для сценарію "OUT"

Обладнання для аналізу якості атмосферного повітря повинно бути добре спроектовано і має включати впускний зонд, встановлений спереду, для відбору зразків незбуреного повітря (рис. 4). Для зменшення похибки вимірювань БПЛА необхідно обладнати барометричною системою для фіксації точного зависання на заданій висоті та GPS-навігацією для швидкого і точного переміщення в задану точку.

Залежно від потужності випущеного снаряду збільшується або зменшується відстань вертикального і горизонтального поширення забруднювальних речовин і відповідні переміщення вимірювальних засобів до заданої точки вимірювання й аналізу стану атмосферного повітря.

Вимірювання показників стану атмосферного повітря здійснюється над місцем пострілу на висотах 3 та 6 метрів від орієнтовної точки влучання та по діагоналі ліворуч чи праворуч відносно осі координат (рис. 5).

Результати попередніх лабораторно-польових випробувань підтверджують гіпотезу про доцільність використання вимірювальних комплексів на базі безпілотних літальних апаратів (табл. 2).



Рис. 4. Модернізований БПЛА із газоаналізатором

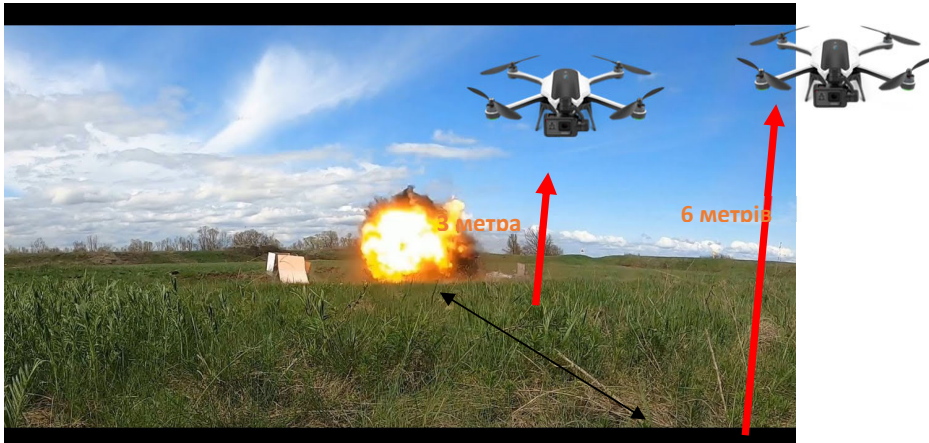


Рис. 5. Схематичне зображення розташування БПЛА

Таблиця 2

Результати попередніх польових досліджень якості атмосферного повітря

Показники	Вертикаль		Діагональ		Фонові, 3 м
	3 метри	6 метрів	3 метри	6 метрів	
ТЧ2.5, мкг/м ³	21,5	16,4	17,4	–	13
ТЧ10, мкг/м ³	27,1	26,0	29,9	–	26,3
СН ₂ О (формальдегід), мкг/м ³	16,0	12,0	15,6	13,0	13,0
СО, мкг/м ³	985,00	543,00		–	700,04
О ₃ , мкг/м ³	40,91	39,91	39,91	39,91	39,91

ВИСНОВКИ

1. Результати експериментальних досліджень змін стану атмосферного повітря після пострілів із стрілецької зброї в двох вищенаведених сценаріях свідчать про підвищення концентрацій забруднювальних речовин інколи навіть у два рази від фонового показника, які з часом розсіюються. Враховуючи навіть похибку у вимірюваннях приблизно 8–15%, однозначно можна стверджувати, що різке підвищення вмісту забруднюючих речовин спричинене саме засобами ведення вогню.

2. Залежно від потужності вибуху або калібру зброї збільшується і концентрація забруднювальних речовин у повітрі. Отримані дані, які в подальшому можна обробляти і вивести статистику по забрудненню атмосферного повітря, можна рекомендувати для використання у розрахунках завданої шкоди навколишньому середовищу від військових дій.

3. Для врахування вертикального і горизонтального поширення забруднювальних речовин в часі і просторі доцільно використовувати вимірювальні комплекси на базі безпілотних літальних апаратів. Це дозволить мінімізувати похибки у вимірюванні показників якості атмосферного повітря та отримувати більш розгорнуту картину поширення забруднювальних речовин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Assembly of States parties to the Rome Statute. URL: <http://surl.li/oaihe>.
2. Гардашук Т. Війна і довкілля. URL: <https://day.kyiv.ua/uk/article/den-ukrayiny/viyna-i-dovkilliy>.
3. Проект Плану відновлення України : матеріали робочої групи «Екологічна безпека». Липень, 2022 р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf>.
4. Війна росії проти України пришвидшує зміну клімату та спричиняє збільшення викидів парникових газів / Міндовкілля. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-viina-rosii-proty-ukrainy-pryshvydshuie-zminu-klimatu-ta-sprychyniaie-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-haziv>.
5. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-%D1%80#Text>.
6. Про затвердження Методики розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 13 квітня 2022 року № 175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text>.
7. Збільшення ризику «кліматичного покарання» через забруднення та зміну клімату. URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-air-quality-and-climate-bulletin-highlights-impact-of-wildfires?fbclid=IwAR0Ar-G2PzITIdT-T6230lvxUrrxIYdwOhcnUtc7wIZcOnCY9ivZuuVuIs>.
8. A Practical Guide for Individuals, Cities, Governments, Schools & Universities, Businesses, Civil society. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40547/2022_clean_air_day.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
9. Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання / Н. Макаренко, В. Строкаль, Є. Бережняк, В. Бондарь, С. Павлюк Л. Вагалюк, О. Наумовська, М. Ладика, А. Ковпак. *Наукові доповіді Національного університету Біоресурсів і природокористування України*. 2022. № 4 (98). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/16137>.
10. Адаменко О.М., Адаменко М.О. Технології інженерно-екологічних досліджень. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1. С. 168–195. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2017_1_25.
11. A New Approach to Solving the Problem of Atmospheric Air Pollution in the Industrial City. *Hindawi / Z. Oralbekova, T. Zhukabayeva, K. Iskakov, M. Zhartybayeva, N. Yesimova, A. Zakirova, A. Kussainova. Scientific Programming*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8970949>.
12. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A542%3AFIN>.
13. Bachrach A., He R., Roy N. Autonomous flight in unknown indoor environments. *Int. J. Micro Air Veh.* 2009.

REFERENCES

1. Assembly of states parties to the rome statute. Retrieved from <http://surl.li/oaihe>.
2. Gardashuk T. Viina i dovkillia [War and the environment]. Retrieved from <https://day.kyiv.ua/uk/article/den-ukrayiny/viyna-i-dovkilliy> [in Ukrainian].

3. Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy. Materialy robochoi grypy "Ekologichna bezpeka" [Project of the Recovery Plan of Ukraine. Materials of the working group "Environmental safety"], lypen 2022. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recovery-rada/ua/environmental-safety-assembly.pdf> [in Ukrainian].
4. Mindovkillia: Viina rosii proty Ukrainy pryshvydshue zminy klimatu ta sprychyniae zbilshennia vykydiv parnykovykh gaziv [Russia's War Against Ukraine Accelerates Climate Change and Increases Greenhouse Gas Emissions]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-viina-rosii-proty-ukrainy-pryshvydshue-zminu-klimatu-ta-sprychyniae-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-gaziv> [in Ukrainian].
5. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainu "Pro skhvalennia Kontsepcii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zminy klimatu na period do 2030 roku" [Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On the approval of the Concept of implementation of state policy in the field of climate change for the period up to 2030"]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
6. Pro zatverdzhennia Metodyky rozrahunku neorganizovanykh vykydiv zabrudniuuchuh rehovyn abo sumishy takykh rehovyn v atmosferne povitria vnaslidok vynyknennia nadzvechainykh situacii ta/abo pid chas dii voennogo stanu ta vyznachennia rozmiriv zavadanoi shkody [On the approval of the Methodology for calculating unorganized emissions of polluting substances or a mixture of such substances into the atmospheric air as a result of emergency situations and/or during martial law and determining the amount of damage caused]. Nakaz Mindovkillia vid 13 kvitnia 2022 roku № 175. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text> [in Ukrainian].
7. Zbilshennia ryzyku "klimatychnogo pokarannia" cherez zabrudnennia ta zminy klimatu. Retrieved from [Increasing risk of "climate punishment" due to pollution and climate change]. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-air-quality-and-climate-bulletin-highlights-impact-of-wildfires?fbclid=IwAR0Ar-G2PzITIdT-T6230lvxUrrx-lydwOh-cnUtc7wZcOnCY9ivZuuVuIs> [in Ukrainian].
8. A Practical Guide for Individuals, Cities, Governments, Schools & Universities, Businesses, Civil society. Retrieved from https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40547/2022_clean_air_day.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
9. Makarenko, N., Stokal, V., Berezhniak, E., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovsra, O., Ladyka, M., & Kovpak, A. (2022) Vplyv rosiiskoi voennoi agresii na oryrodni resursy Ukrainu: analiz sytuacii, metodologiia ociniuvannia [The impact of Russian military aggression on the natural resources of Ukraine: analysis of the situation, assessment methodology]. Naukovi dopovidi NUBIP Ukrainu – *Scientific reports of NUBiP of Ukraine*. № 4(98). Retrieved from <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/16137> [in Ukrainian].
10. Adamenko, O.M., & Adamenko, M.O. (2017). Tekhnologii inzhenerno-ekolohichnykh doslidzhen [Technologies of engineering and ecological research]. Ekolohichna bezpeka ta zdalansovane resursokorystuvannia – *Environmental safety and balanced resource use*. – 1. 168–195. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2017_1_25/ [in Ukrainian].
11. Zhanar Oralbekova, Tamara Zhukabayeva, Kazizat Iskakov, Makpal Zhartybayeva, Nargiz Yessimova, Alma Zakirova and Ainur Kussainova. (2021) A New Approach to Solving the Problem of Atmospheric Air Pollution in the Industrial City. Hindawi. Scientific Programming. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2021/8970949>.
12. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A542%3AFIN>.
13. Bachrach, A.; He, R., & Roy, N. (2009) Autonomous flight in unknown indoor environments. *Int. J. Micro Air Veh.*

ABSTRACT

METHODOLOGICAL APPROACHES TO MONITORING STUDIES OF THE IMPACT OF MILITARY FIRE ON THE ATMOSPHERIC AIR

The paper presents methodological guidelines and recommendations for measuring the impact of military operations on air quality, mainly by such indicators as fine dust (solid particles of 2.5 and 10 microns/m³ – PM_{2.5}, PM₁₀), formaldehyde, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, and ozone. The impact of various means of fire (artillery, tanks, grenade launchers, machine guns, etc.) is analyzed using mobile automatic observation stations capable of continuously recording changes in air quality or a specially designed quadcopter with a gas analyzer that can continuously measure the level of air pollution and instantly move the measurement point both in the plane and vertically. The measurements are carried out in close to real combat conditions, taking into account all factors affecting the measurement results. The location of the analyzing devices was chosen taking into account the factors affecting the sensors, and the most optimal distance to the epicenters of contamination (explosions) was found experimentally. Two scenarios are considered: analysis of air quality directly at the place of the shot, and changes in air quality at the place of impact of a cartridge, projectile, etc. The data obtained after the shots are recorded in the relevant tables and compared with background and regulatory indicators. In addition to the automatic stations, it is also possible to measure air quality at the places of shooting and arrival remotely using specially designed unmanned aerial vehicles (UAVs) with a remote online camera, GPS navigation for precise movement, and mounts for automatic gas analyzers.

The use of the unmanned vehicle is carried out in compliance with safety precautions and under the supervision of the relevant licensing authorities. The results of all measurements indicate a sharp increase in the content of pollutants caused by the means of fire. The data obtained can be recommended for use in calculating the environmental damage caused by military operations.

Key words: monitoring, fine dust, air pollution.